

地球温暖化の経済評価のためのリカーシブモデルの開発

安藤朝夫*・小尻利治・菊池祥子**・中畠一憲***

* 東北大学大学院情報科学研究科

** 本州四国連絡高速道路(株)

*** 東北大学大学院環境科学研究科

要 旨

地球温暖化は人類の持続可能性を危うくする問題という認識が広がり、大循環モデル(GCM)を用いて長期的な気候変化に関する緻密な予測がなされている。しかしGCMの予測は、経済活動に関する固定的なシナリオに基づいており、排出権価格の上昇や災害の増加が経済活動へ及ぼす影響は考慮され得ない。本稿はGCMモデルと対話的に実行できる、リカーシブな経済活動モデルの提案を目的とする。モデルは準動学的なSCGE(空間応用一般均衡)モデルとして記述され、水災害の影響を考慮した財生産・CO₂排出量とそれらの価格が地域別に算出可能な枠組みを提供するが、技術的にはGCMとSCGEモデルの空間的・時間的解像度の相違に関するインターフェイスの提案がポイントとなる。

キーワード：地球温暖化，空間応用一般均衡，リカーシブ動学，空間・時間解像度

1. はじめに

地球温暖化が人間文明の持続可能性を阻む重要問題であることは、政府間の共通認識となりつつある。この問題を解決するためには、各種政策の下に経済活動に伴う気候変動を的確に予測し、その結果から政策の評価を可能にする長期シミュレーションモデルが有用である。気候変動の将来予測に関しては、地球全体を緯度・経度・標高(水深)の3次元メッシュで捉え、メッシュ間の循環を時間を追って予測し得る大循環モデル(General Circulation Model: 以下、GCMとする)が実用化されている。しかし既存のGCMは、将来の経済活動(100年分のエネルギー消費量やCO₂排出量)を固定的シナリオとして与えるため(IPCC(2000)参照)、経済活動による気候変化が経済活動に及ぼす影響を正当に評価することはできない。

他方、経済モデルに気候変動を組み込む努力はNordhaus *et al.* (2000)などによってなされているが、経済モデルが前提とする空間や時間のレベルでは、精緻な気候変動の分析を行うことは不可能に等しいと言える。経済統計の大勢は、空間的には国乃至それを幾つかに分割した地域単位、時間的には概

ね1年単位でしか得られないからであり、最小100kmメッシュ・6分単位といった細密な予測が可能な気候変動モデルとの間のギャップは大きい。

本稿の目的は、経済活動モデルと気候変動モデルからなるリカーシブ動学モデルを想定し、その構成要素となる経済活動モデルを提案することにある。上の議論から、そのようなモデル作成にあたっては、第1に両モデルの時間的・空間的スケールを整合させる必要がある。本研究の経済活動モデルでは、全世界を大陸と所得レベルにより9区分した地域に関し、1年単位で計算することを基本方針とし、地域単位の結果をメッシュ単位に配分する補助モデルを用いて気候変動モデルへ投入可能な形に変換する。

第2に経済活動モデルと気候変動モデルとの間で交換する、データの種類の決める必要がある。経済活動に影響を与える要因を、Nordhaus *et al.* (2000)はTable 1のように整理しているが、本研究では基本的にエネルギー消費に伴うCO₂排出量の予測を最終的にはメッシュ単位に変換して気候変動モデルに提供する一方、気候変動モデルからはメッシュ単位の降水量と気温等の気象データを時間単位で受け取る。

第3に温暖化に伴う異常気象の頻発に伴い、水資

Table 1 Categories of economic impacts expected from global warming. (Nordhaus(2000))

	Category	Impact	Description
1	農業	±	気温・降水量変化による生産性の変化
2	海面上昇	－	海面上昇による土地や海浜施設の喪失
3	非農業市場部門	－	洪水・渇水による産業生産・家計消費の変化
4	健康	－	気温変化による熱帯性疾病の増加
5	非市場 Amenity	±	戸外活動時間の増減
6	居住	－	海面上昇からの住民, 都市・文化遺産の保護, 移住の社会的費用
7	生態系	－	種の消失, 雪氷圏への影響, 海岸生態系の悪化
8	Catastrophe	－	海面の急上昇, モンスーン域の移動, 温暖化の暴走, 南極氷床の崩壊, 海流変化

源或いは水災害の影響を評価する必要がある。地域レベルでの水資源分布や水災害の経済評価に関する既存の研究は存在するが(たとえば高木・武藤・太田, 2001), 温暖化と関連付けて全球レベルでの定量的評価を試みた研究は筆者の知る限り例を見ない。水資源は生産要素としての側面があり, 渇水時に水需要が供給を上回ると生産阻害要因となるが, 逆に洪水時には経済活動のみならず市民生活にも多大な損害を与える。降水のデータはメッシュレベルで与えられるが, それに伴う渇水や洪水の被害は流出の結果生じるので, 降水量から表流水のメッシュ間移動を考慮した流量を計算し, 被害の発生する期間と場所を特定するための「流出モデル」が別途利用できることを前提としている。

水資源や水災害は時間的・空間的に偏在するので, 大陸レベルの大地域で1年単位で見ると, 問題が発生する確率は高くないことは事実であるが, 経済活動は沿海地域等の低地に集中しているため, 大地域の経済活動に平均値以上の影響を及ぼす。従って, 経済活動モデルと気候変動モデルの空間的・時間的解像度の相違を踏まえた, 操作可能なインターフェースの提案が本研究の中心的課題となる。

2. モデルの概要と空間スケールの整合

経済活動モデルにおける空間単位は, 経済統計入手の可能性により空間的に不整形な国(地域)の形状に支配されるのに対し, GCMでは経度・緯度方向の球面座標系に高さ方向を加えた3次元メッシュで, 空

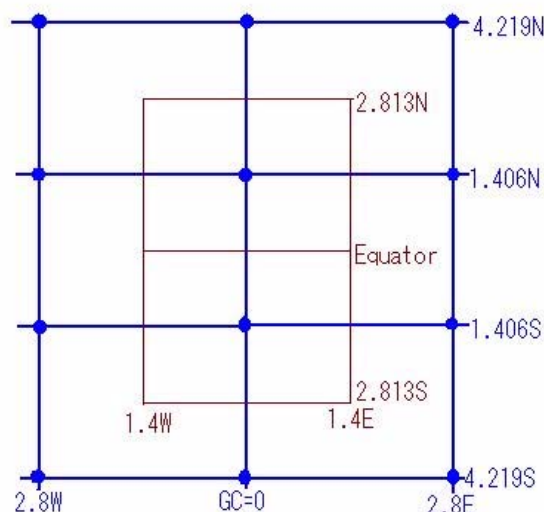


Fig. 1 Definition of meshes in general circulation model.

間を幾何学的に把握することが一般的である。このうち緯度方向は, $\mu = \sin \phi$ を引数とする Legendre 多項式の0点をデータ点(=メッシュ中心点)として離散化されるが, 分割数を J とすれば j 番目のメッシュ中心点は以下で近似できる。

$$\phi(j) = \pi(J + 1 - 2j)/2J, \quad j = 1, \dots, J. \quad \dots\dots (1)$$

従って経済活動モデルの空間解像度を考えるなら, 地表面を経度・緯度方向に等間隔で区切ったメッシュによる近似で十分である。本研究では, 経度・緯度を約2.8度刻みで区切った $128 \times 64 = 8192$ 個のメッシュ単位で空間を把握することを想定するが, 以下ではこのメッシュを添え字 m で表す。なお赤道付近ではメッシュ1個はほぼ1辺300kmの正方形の領域に相当する(Fig.1参照)。

本研究で想定するモデルの流れをFig.2に示す。経済活動モデルの計算は, 空間的に不整形な大きな地域単位で進行し, 各期のエネルギー消費とそれに伴うCO₂排出が地域別に計算される。地域区分としては, 大陸レベルの地域を所得レベルに応じて分割した地域を基本とする。国単位では, 統計が未整備の途上国を扱うことが困難になることと, 経済活動に伴う環境要因としてCO₂のみを考慮する場合には, 細かい空間単位での排出場所の把握は必ずしも必要ないからである。¹地域別排出量から大気圏のCO₂蓄積が計算され, メッシュ単位での気温や降水量が

¹大気圏全体で速やかに平衡状態に達するためだが, 細かい空間単位での排出量予測は, NO_xやSO_x等, より局所的な環境評価には有効であろう。時間単位に関しても, GCMの経済シナリオ自体が年単位を前提とするため, 細かい時間単位での出力は要求されない。

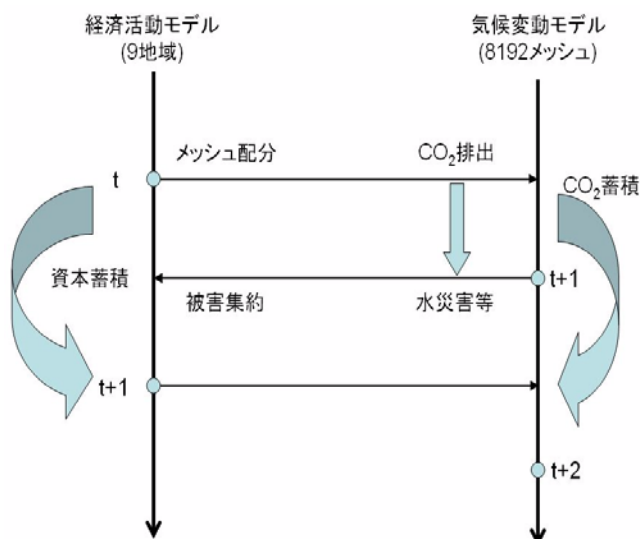


Fig. 2 Basic interactions between economic and circulation models.

計算される。流出モデルは降水量を入力として、各メッシュ単位での渇水・洪水の状況を計算するが、その結果から各メッシュ単位での産業活動の阻害状況が把握され、それを地域単位に集約することで、次の期の経済活動レベルへフィードバックされる。²

経済活動モデルと気候変動モデルの空間解像度の違いをインターフェイスするために、前者における離散的な地域単位で得られる変数を、後者の空間メッシュ単位に換算する補助的なモデルが必要になる。以下では地域 r の人口 N^r を例に、その基本的な考え方を述べる。

Table 2は、地球の全面積を標高に従って10段階に区分し、その面積比率を示したものである。人類の活動、とりわけ産業生産は赤道付近や高緯度帯を除いて、殆ど低地に集中していると考えられるので、すべてのメッシュに関して陸域を標高で区分し、各地域の経済活動は極地を除いて、特定の標高閾値以下の面積に均等に分布すると考える。

いま $\rho(m, h)$ をメッシュ m で標高 h メートル以下の陸域の比率とし、³メッシュ m に含まれる国の引数の集合を $\mathcal{I}(m)$ 、地域 r に含まれる国の引数の集合を $\mathcal{N}(r)$ 、北極圏に含まれるメッシュの集合を $\mathcal{A}$ とする。この

²1年という有限の期間を取れば、その間の経済活動がその期の気候を変化させ、その期の経済活動に直接影響を与える結果、当初想定された経済活動レベル自体を修正する必要があると考えるべきかも知れない。しかしCO₂蓄積に伴う気候変化は徐々に進行するので、経済モデル側で気候変動を含めた同時均衡を考えることは、計算コスト面から不必要だと考える。

³ここでは閾値として上限だけを考えるが、地球温暖化に伴う海面上昇を考えるなら、下限も考慮すべきかも知れない。

Table 2 Classification of elevations.

	Elevation	Proportion to the earth surface
1	Sea	66.97 %
2	Under 0 m	0.13 %
3	0–10 m	0.69 %
4	10–50 m	1.47 %
5	50–100 m	1.95 %
6	100–200 m	3.62 %
7	200–500 m	7.24 %
8	500–1000 m	5.17 %
9	1000–2000 m	5.02 %
10	Over 2000 m	7.72 %

とき地域の人口 N^r のうち、メッシュ m に属する部分 $N^r(m)$ を、メッシュ面積 $S(m)$ をウエイトとして以下の式により近似する。

$$N^r(m) = \frac{\sum_{\mathcal{N}(r) \cap \mathcal{I}(m)} \rho(m, h) S(m) / \#(\mathcal{I}(m))}{\sum_{m \notin \mathcal{A}} \sum_{\mathcal{N}(r) \cap \mathcal{I}(m)} \rho(m, h) S(m) / \#(\mathcal{I}(m))} N^r, \quad \text{for } m \notin \mathcal{A} \quad (2)$$

ここに $\#(\cdot)$ は、集合の大きさ (cardinality) を表す関数である。なお北極圏に含まれるメッシュ $m \in \mathcal{A}$ に関しては、定義的に $N^r(m) = 0$ を仮定する。

上式は、各メッシュに含まれる標高 h メートル以下の面積を、そのメッシュに係る国の数で均等割りし、それを地域単位で集計したものの比率で地域人口をメッシュに振り分けるものである。従って地域 r について $N^r(m)$ の和をとれば、メッシュ人口の近似値 $N(m)$ が得られる。

$$N(m) = \sum_r N^r(m) \dots\dots\dots (3)$$

本モデルでは人口に限らず、 i 財生産額 X_i^r や j 項目最終需要 W_j^r など、殆どの経済指標が(2)式によってメッシュに配分可能であると仮定する。

3. 経済活動と温暖化

Nordhaus *et al.* (2000) は、地球温暖化の経済活動に及ぼす影響軸を、Table 1に示す8種類に分類している。本研究では、そのうち(1) 農業と(3) 非農業市場部門の産業生産部門に着目してモデル化を行う。消費部門に関しても、住居の浸水や断水等の直接的影響を受けるが、これはNordhausが(6) 居住に分類する種類の影響とは異なる。消費部門が受ける影響の大半は、生産活動の影響が市場での価格変化を通じて波及したものであるから、これらを別途考慮する必要はない。⁴

⁴費用・便益分析(CBA)には、影響を考慮する段階に応じて、源泉分析法と帰着分析法の2つの方法がある。前者

地球温暖化をもたらす温室効果ガス(GHG)としては、2酸化炭素(CO₂)以外に、メタン(CH₄)、フロン(CFC等)、亜酸化窒素(N₂O)などが知られている。このうちフロンについては対策が進み、今後大きな温暖化の原因になるとは思えない。メタンと亜酸化窒素は生物の分解に伴って自然界でも発生するが、人為的には窒素肥料の大量使用や燃料使用時の漏出などに伴って発生する。しかしCO₂は、人類の正常な経済活動に伴って必然的に発生するため代替が不可能であり、かつ環境庁(1997等)の推計によれば、今後100年間の温暖化原因の64%はCO₂に起因すると予測されるため、本研究では経済活動に伴うCO₂の排出に絞ってモデル化を行う。

生産関数には、要素投入のみを考慮する付加価値生産関数(金額表示)と、その他の中間投入を考慮する産出生産関数(物量または金額)の2種類があるが、説明のため、より簡便な前者を用いるならば、地域*s*における*j*部門の*t*時点の生産関数は、資本*K_j^s*、労働*L_j^s*、CO₂排出量*E_j^s*を用いて以下のように書ける。

$$Y_j^s(t) = A_j^s(t)f_j^s(K_j^s(t), L_j^s(t), E_j^s(t)) \dots\dots\dots (4)$$

ここに*A_j^s(t)*は、操業率を表すHicks中立的な生産シフト関数であり、地域*s*ごとに異なる生産技術が許容される。また生産関数の3要素に関する偏導関数は、何れも正と仮定されるが、 $\partial Y_j^s / \partial E_j^s > 0$ は、他の状況が同じであればCO₂をふんだんに排出する方が生産性が高いことを意味する。

農業部門では、気温の上昇が農作物の成育に多大な影響を与えることは明白であるが、ここでは洪水・渇水に着目することにする。一般に温暖化と、洪水・渇水等の水災害の発生とは深く関連することが疑われるからである。

自然災害の影響はフロー効果とストック効果に分離して考えることができるが、前者についてはメッシュの水深が一定の閾値(上限と下限)の範囲外にあると操業が不可能になると考える。ただしメッシュの大きさは赤道付近で1辺300kmと巨大であり、メッシュ全体の水深を同一視することはできない。⁵実際、水害は勝れて局所的な事象であり、同じ水深の与える影響は、社会資本整備の程度によっても大きく異なる。従って洪水・渇水と認識される閾値はメッシュ別に定める必要がある。

いまメッシュ*m*、時刻*t*における水深を*h(m, t)*で表がより一般的と言えるが、その場合は主体ごとに直接効果を計上する必要があり、間接効果とされる外部効果のうち、市場を経由する金銭的外部効果を計上することは誤りである。(土木学会編, 1989)

⁵もし地表水がメッシュ上に一様に分布するなら、水深が1cm上下する場合の水量の差は9億トンに達する。

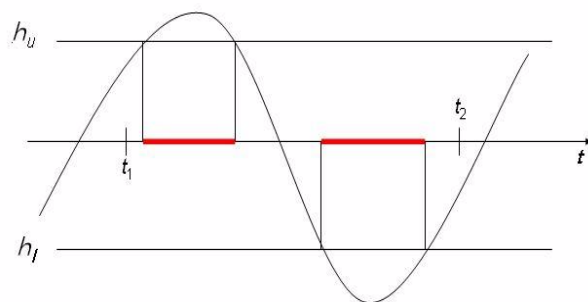


Fig. 3 Definition of water disaster affected time ratio.

し、正常な経済活動が営める閾値の上限と下限をメッシュ固有の値として*h_u(m)*, *h_l(m)*で表す。この時、期間(*t₁*, *t₂*)における異常事態(洪水または渇水)の時間比率は以下のように表される。

$$\phi(m, t_1) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} g_u(t)dt + \int_{t_1}^{t_2} g_l(t)dt}{t_2 - t_1}, \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{where } g_u(t) = \begin{cases} 0, & \text{if } h(m, t) < h_u(m), \\ 1, & \text{if } h(m, t) \geq h_u(m), \end{cases}$$

$$\text{and } g_l(t) = \begin{cases} 0, & \text{if } h(m, t) > h_l(m), \\ 1, & \text{if } h(m, t) \leq h_l(m). \end{cases}$$

ここに*φ(m, t₁)*は、Fig.3の区間(*t₁*, *t₂*)に占める太線の比率に相当し、左辺を時刻*t₁*で評価しているのは、経済モデルでは離散的な期間中の経済活動を期初に一括計算することを反映している。さらに異常事態に伴う影響は産業部門*j*ごとに異なるが、その程度を*π_j*で表すことで、メッシュ*m*におけるHicks中立的な生産シフトパラメータ*A_j(m, t)*を以下のように書くことができる。

$$A_j(m, t) = \pi_j(1 - \phi(m, t)) \dots\dots\dots (6)$$

結果的に地域*s*の*t*期における*j*生産額は、

$$\hat{Y}_j^s(t) = \sum_{m \in A} A_j(m, t)f_j^s(K_j^s(m, t), L_j^s(m, t), E_j^s(m, t)) \quad (7)$$

で与えられるから、地域*s*の平均的な操業率*A_j^s(t)*は、

$$A_j^s(t) = \frac{\sum_{m \in A} A_j(m, t)f_j^s(K_j^s(m, t), L_j^s(m, t), E_j^s(m, t))}{\sum_{m \in A} f_j^s(K_j^s(m, t), L_j^s(m, t), E_j^s(m, t))} \quad (8)$$

で事後的に計算される。⁶

渇水の影響はほぼ渇水期間内で完結が予想されるのに対し、洪水の影響は洪水期間を超えて長期化する可能性があるが、これは洪水に関してはストック

⁶農業の場合、洪水・渇水の時期(季節や時間的つながり)によって影響が異なることが予想されるが、第一近似としては時期の差は考慮しない。

効果が無視できないことを意味する。洪水のストック効果は物的資本 $K_j^s(m, t)$ や人的資本 $L_j^s(m, t)$ の減少として表現できるが、滅失の程度については期間最大水深 ($\max_{t \in (t_1, t_2)} h(m, t)$) と上限の閾値等の関数として別途推定する必要がある。たとえば資本の滅失率を $\kappa_j^s(m, t)$ とすれば、

$$\kappa_j^s(m, t) = \kappa_j^s(\max\{\max_{t \in (t_1, t_2)} h(m, t) - h_u(m), 0\})$$

により、 $\bar{K}_j^s(m, t) = (1 - \kappa_j^s(m, t))K_j^s(m, t)$ を新しい資本量として用いればよい。

4. 主要データソースと地域・産業区分

経済活動モデルと気候変動モデルを相互反復的に実行する枠組みは Fig.2 に示した通りである。前者は基本的に大地域区分で進行し、後者との時間・空間解像度の差を整合するために、補助的なモデル (2), (8) を用いてメッシュ分割・地域集計を行う。経済活動モデルは、基本的には地域産業連関モデルをベースとする多地域の CGE モデル (Spatial Computable General Equilibrium Model) として構成される。

全世界を対象とする経済モデルとしては、Purdue 大学を中心に実施されている GTAP (Global Trade Analysis Project) が有名である。基本的には貿易障壁が多国間での経済指標に及ぼす影響を評価するためのモデルであり、87ヶ国 (地域) の産業連関表を含む横断面データが蓄積されている。⁷ 一方、途上国を含むマクロ時系列データとしては、世界銀行の WDI (World Development Indicators) が最も包括的であるが、産業分類の粗さと欠損値の多さに問題がある。

WDI は大地域分類として、東アジア・太平洋、ヨーロッパ・中央アジア、南アジア、中東・北アフリカ、サハラ以南のアフリカ、北米、中南米・カリブ海の 7 地域を採用し、各地域内の中低所得国を集約したデータを表章している。これは国単位だと、特に途上国に関して欠損値が多くなり過ぎるのを避けるためでもある。生産技術や支出構成等は国の発展段階に応じて異なると考えられるから、本モデルでは基本的に上記大地域を高所得と中低所得に区分した地域分類を採用し、生産技術に関しては GTAP に含まれる産業連関表から投入係数を算出する。GTAP の地域区分は 18 の集約地域を含むが、所得レベルの異なる国が包含される場合には、人口規模から見て過半数を占める側に集約地域全体のデータを合算する。⁸

上記 7 地域分類のうち、南アジアとサハラ以南の

⁷ 現行データは 2001 年を基準年とする GTAP-6 であるが、ドキュメントは GTAP-5 までしか完備されていない。(Dimaranan *et al.*, 2002)

⁸ 別掲された国を除く、その他の東アジア、その他の東

アフリカには高所得国が存在せず、逆に北米は高所得国のみで構成される。イスラエルといくつかの産油国は高所得国であるが、GTAP のデータは中東地域を一括表章するため、生産技術を所得レベルで分離することは不可能である。中南米・カリブ海には高所得国が 5ヶ国あるが、いずれもカリブ海の島嶼国であり、GTAP のデータでは一括表章されている。以上により、本モデルでは Table 3 に示す 9 地域分類を採用する。

Table 3 The regional classification.

	Code	Description	Income
1	APH	East Asia & Pacific	High
2	APL	East Asia & Pacific	Middle/Low
3	ECH	Europe & Central Asia	High
4	ECL	Europe & Central Asia	Middle/Low
5	MEA	Middle East & North Africa	Mixed
6	SAS	South Asia	Middle/Low
7	AFR	Sub-Saharan Africa	Middle/Low
8	LAC	Latin America & Caribbean	Mixed
9	NAM	North America	High

GTAP の産業分類は 57 部門と細かいのに対し、WDI で分割可能なのは農業、製造業、その他 2 次産業、サービス業の 4 部門に過ぎない。本モデルは基本的に WDI の分類に依拠するが、地球環境問題を対象とする場合には、エネルギー部門を独立して分析できることが望ましいことを考慮して、以下の 5 部門で産業活動を記述する：(1) 農業、(2) 製造業、(3) エネルギー、(4) その他 2 次産業、(5) サービス業。

ただしエネルギー部門を、資源側と需要側の何れで定義するかに関しては裁量の余地がある。国連標準産業分類 (ISIC 3.1) の中分類で記述するならば、前者には「その他 2 次産業」に含まれる 10 (石炭・亜炭・泥炭)、11 (原油・天然ガス) 及び 12 (ウラン・トリウム鉱石) が該当し、後者には製造業に含まれる 23 (コークス・石油精製・原子力燃料) とサービス業に含まれる 40 (電力・ガス・熱水供給) が該当する。⁹ たとえば石油埋蔵量の枯渇に伴う価格上昇を分析する場合には前者の方が直接的であるが、炭素税のエネルギー需要抑制効果を見る場合には後者の方が直接的である。次章では後者の定義を前提として定式化を行う。

最終需要は以下の 4 項目で把握する：(1) 民間消費

南アジア等の地域。前者は北朝鮮・マカオ・モンゴル、後者はブルネイ・カンボジア・ラオス・ミャンマー・東チモールから成る。このうちマカオとブルネイは高所得国だが、大勢は低所得であると思わせる。

⁹ GTAP の産業分類では、前者は 15 (Coal)+16 (Oil)+17 (Gas) に、後者は 32 (Petroleum, coal products)+43 (Electricity)+44 (Gas manufacture, distribution) に相当する。

支出, (2) 民間投資支出, (3) 政府支出, (4) 輸出入バランス。

政府支出には, 消費的経費(経常支出)と投資的経費が含まれるが, データ的に両者を分離することは困難である。しかし洪水・渇水の閾値は公共投資と密接に関係するため, 将来的には分離が望ましい。

生産要素としては資本と労働を考えるが, CO₂ 排出量も要素の1種として扱う。水資源も利水面からは要素と考えることも可能であるが, 洪水のようなマイナスの側面もあるため, 生産関数をシフトさせる関数の形で考慮する。CO₂ 排出量は, エネルギー消費から直接計算可能であり, 排出権割当との間で価格が形成される。世界政府は排出権を適切に割り当て, 排出権取引を管理するために存在するのに対し, 地域政府は国内での徴税と政府支出を決定する。

輸送費は地域間の価格差を定める重要な要因であるから, 安藤他(1996)では運輸部門に特別な定式化を採用した。しかしWDIでは独立のデータが得られないため, 産業分類上はサービス業の内数として扱い, 一種の補助的会計を設けて別途考慮する。このためモデルにおける主体としては, (1) 産業(企業), (2) 家計, (3) 地域政府に加えて, 補助的主体として, (4) 運輸部門と(5) 世界政府を考慮する。

経済活動モデルの主要な出力をまとめると, 以下のようである: (1) 産業別生産額, (2) エネルギー需要, (3) CO₂ 排出量, (4) 要素所得, (5) 項目別最終需要額, (6) 財別価格, (7) 財別貿易額。

このうち(1)~(5)はメッシュ単位への配分が可能であるが, 残りは地域レベルで, いずれも毎年計算される。逆に経済活動モデルは, 流出モデルに時間別・メッシュ別の洪水・渇水状況と, 気候変動モデルに大気中のCO₂ 濃度(蓄積量)を要求する。

5. 経済活動モデル

本節でははじめに主要な3つの主体(企業・家計・地域政府)について, その行動を定式化するが, データとして地域別の産業連関表(投入係数及び最終需要支出比率)が利用可能であることを前提とする。¹⁰

5.1 産業部門

s 地域 j 産業の産出量は, 中間投入財として r 地域産の i 財, x_{ij}^{rs} , 生産要素として自地域の資本 K_j^s , 労働 L_j^s と CO₂ 排出割当量 E_j^s を用いて, 以下の Cobb-

¹⁰ 孟・安藤(2004)では金銭的技術を固定し, 物量に関して代替を許す生産技術を前提に中国経済を分析した。1国のようにある程度の均質性を仮定できる地域では, そのような設定はモデルの簡略化に有効であるが, 全世界を対象とする場合には金銭的技術の地域差は無視できない。

Douglas型生産関数により定義される。

$$X_j^s = \prod_i \left(\sum_r x_{ij}^{rs} \right)^{\alpha_{ij}^s} (K_j^s)^{\alpha_{Kj}^s} (L_j^s)^{\alpha_{Lj}^s} (E_j^s)^{\alpha_{Ej}^s} \dots \quad (9)$$

ここに指数に関して, 1次同次性を仮定する。¹¹

$$\sum_i \alpha_{ij}^s + \alpha_{Kj}^s + \alpha_{Lj}^s + \alpha_{Ej}^s = 1 \dots\dots\dots (10)$$

CO₂ 排出割当量 E_j^s は, 世界全体の総排出権 E のうち, s 地域の j 産業に割り当てられた部分を指し, 排出権取引後の実数を示す。実際のCO₂ 排出量はエネルギー財投入量 $\sum_r x_{3j}^{rs}$ に比例すると考えられるから,

$$a_{ej}^s \sum_r x_{3j}^{rs} \leq E_j^s \dots\dots\dots (11)$$

が成り立たねばならない。排出原単位 a_{ej}^s はエネルギーの燃焼効率に相当し, 産業や地域によって異なるのが一般的である。また3.の議論から $\partial X_j^s / \partial E_j^s > 0$, すなわちCO₂ の排出割当量が多いほどCO₂ が生産に関して制約的でなくなるから, $\alpha_{Ej}^s > 0$ である。

経済が効率的ならば(11)は等号で満たされるはずだから, s 地域産の j 財の価格を p_j^s として利潤関数は以下のように書ける。

$$\begin{aligned} \pi_j^s = & p_j^s \prod_i \left(\sum_r x_{ij}^{rs} \right)^{\alpha_{ij}^s} (K_j^s)^{\alpha_{Kj}^s} (L_j^s)^{\alpha_{Lj}^s} (a_{ej}^s \sum_r x_{3j}^{rs})^{\alpha_{Ej}^s} \\ & - \sum_i q_i^s \sum_r x_{ij}^{rs} - \rho_j^s K_j^s - \omega^s L_j^s - \theta^s (a_{ej}^s \sum_r x_{3j}^{rs}) \end{aligned} \quad (12)$$

ここに, q_i^s は i 財の s 地域における市場価格であり, 出荷価格 p_i^s に (r, s) 間の輸送費を加味して定まる。また $(\rho_j^s, \omega^s, \theta^s)$ は, それぞれ s 地域の資本レント, 賃金, 排出権価格を意味するが, 添字は要素の移動可能性に関する以下の仮定を反映している。

仮定1. 生産要素は地域に固定されており, 地域間の移動はできない。労働 L_j^s と CO₂ 排出の割当量 E_j^s は産業間を自由に移動できるが, 資本 K_j^s は産業固有のものであり, 他産業への転用は不可能である。¹²

ここでは排出権価格 θ^s は地域ごとに異なると仮定されるが, 世界規模で取引される排出権に価格差が

¹¹ 生産関数の1次同次性を仮定すれば, 産業と代表的企業の行動は同一視できる。ここでは競争輸入の仮定により, (価格を除いて)財の同質性を前提とするため, 実質的には総投入量 $\sum_r x_{ij}^{rs}$ が変数となる。

¹² 準動学モデルにおける資本は先決内生変数であるため, 産業間を移動する扱いは不適切である。ここでの地域は国より大きい単位であるので人口移動が制約的であることは明らかであるが, 産業間の移動が完全に自由であるという仮定は現実の職能差を軽視するものかも知れない。労働も資本と同様に固定的に扱うことは容易であるが, その場合は産業ごとに異なる賃金 ω_j^s が定まる。

あることは効率的ではない。しかし国際間の取引は均一価格で行われても、政府が国内的に異なる価格を産業から徴収し、差額を財政で負担することは可能である。その意味で θ^s は政策的な国内価格に相当し、内外価格差がない場合には θ を用いればよい。

j 産業の問題は、(12)を最大化するような $(x_{ij}^{rs}, K_j^s, L_j^s)$ を求めることである。そのための1階条件から、エネルギー以外($i \neq 3$)の財について、以下が得られる。

$$\alpha_{ij}^s = \frac{q_i^s \sum_r x_{ij}^{rs}}{p_j^s X_j^s} \dots\dots\dots (13)$$

分母は売上額、分子は i 財の中間投入額なので、 α_{ij}^s は s 地域における j 産業の i 財への支出比率を表すが、これは産業連関表の金銭投入係数に他ならない。

一方、エネルギー財($i = 3$)に関する1階条件は以下のように書くことができる。

$$\alpha_{3j}^s + \alpha_{Ej}^s = \frac{(q_3^s + \theta^s a_{ej}^s) \sum_r x_{3j}^{rs}}{p_j^s X_j^s} \dots\dots\dots (14)$$

右辺の分子は単にエネルギー財の調達費用だけではなく、その使用に伴う排出権価格を含む支出を表している。左辺は企業がその2種類の費用に関する支出比率、 α_{3j}^s と α_{Ej}^s を識別する必要はないことを意味する。また排出権以外の生産要素に関する条件は、以下のようである。

$$\alpha_{Kj}^s = \frac{\rho_j^s K_j^s}{p_j^s X_j^s} \quad \text{and} \quad \alpha_{Lj}^s = \frac{\omega^s L_j^s}{p_j^s X_j^s} \dots\dots\dots (15)$$

(12)式では時間 t を省略しているが、準動学的枠組みでは式中のすべての変数が時間に依存することは言うまでも無い。¹³従って企業は各期において(12)式を最大化する必要があるが、結果として得られる生産レベル $X_j^s(t)$ は平常時の生産レベルである。洪水・渇水に伴う生産低下は、(7)式に倣って、Hicks中立的な生産シフトパラメータで表現される。

すなわち、中間財投入・生産要素と排出割当量を2.で述べた方法によりメッシュ単位に配分した結果を $(\sum_r x_{ij}^{rs}(m, t), K_j^s(m, t), L_j^s(m, t), E_j^s(m, t))$ とすれば、洪水・渇水による生産低下後の産出量は、

¹³利潤 $\pi_j^s(t)$ や生産量 $X_j^s(t)$ はフロー変数であって、ある期間に関して計測されるのに対し、生産要素($K_j^s(t), L_j^s$)はストック変数であり、期間 t の期初(時刻 t)における存在量である。排出割当量 $E_j^s(t)$ はフロー変数として扱うが、排出権価格を大気中のCO₂蓄積量に依存して定めるような設定の場合は、ストック変数として扱うことが必要になる。本モデルでは大気中のCO₂蓄積量の計算と、それに伴う降水量の計算を気候変動モデルに委ねているため、経済活動モデル中で蓄積量を直接扱う必要はない。

$$\hat{X}_j^s(t) = \sum_{m \notin A} \pi_j(1 - \phi(m, t)) \prod_i \left(\sum_r x_{ij}^{rs}(m, t) \right)^{\alpha_{ij}^s} (K_j^s(m, t))^{\alpha_{Kj}^s} (L_j^s(m, t))^{\alpha_{Lj}^s} (E_j^s(m, t))^{\alpha_{Ej}^s} \dots (16)$$

で与えられる。(16)式は洪水・渇水のフロー効果のみを捉えるものであるが、浸水等による物的・人的資本の毀損が甚だしい場合には、3.で述べたようにストック効果を別途考慮する必要がある。¹⁴

5.2 家計

s 地域の富の源泉は各産業の粗付加価値(V_j^s)であり、その部門の要素支払の和として表される。

$$V_j^s = \rho_j^s K_j^s + \omega^s L_j^s + \theta^s E_j^s \dots\dots\dots (17)$$

地域内総生産は産業別の粗付加価値の総和として表されるが、ここでは最終需要項目 j' に割り当てられたCO₂排出割当量を $E_{Wj'}$ として、それを排出権価格 θ^s で評価したものを付加価値額に含めて考えることにし、これを s 地域のGDPと呼ぶ。

$$V^s = \sum_j V_j^s + \theta^s \sum_{j'} E_{Wj'}^s \dots\dots\dots (18)$$

一般的な産業連関表では、付加価値部門と最終需要部門は共に外生部門として扱われ、その総和は一致する必要がある。しかし付加価値として回収された産業部門排出権収入は、政府部門の最終需要の一部に充当されると考えることが自然である。最終需要部門からの排出権収入を最終需要と付加価値の交点に記述したとしても、最終需要と付加価値の和に同じ値が算入されるだけで、産業連関表の整合性には影響しないことに注意する必要がある。

付加価値額は家計と政府の間で分配され、家計への分配は今期消費と将来消費(貯蓄)に分配される。そこで可処分所得を定めるために、資本保有、税率、域外からの所得移転に関して次の仮定を設ける。¹⁵

¹⁴安藤・高橋(1997)は、震災による交通施設損壊に伴う中間財の供給不足が隘路となって生じる生産低下を、Leontief型生産関数を用いて表現した。供給不足は通常価格上昇によって調整されるが、社会通念上、震災直後の便乗値上げが許容されないことを反映させるため、価格を震災前の水準に固定し、需給不均衡を意図的に発生させる定式化が採用された。本モデルでは世界規模での価格調整を考慮するため、特定の財が隘路となって生産低下をもたらすという立場は採らない。

¹⁵実際には外資系企業等、その地域の住民によって保有されない企業もあり、出稼ぎ労働に伴う海外送金も無視できないかも知れない。さらに本研究の地域は複数の国を含むため、地域内の税率が一律であると見なすことに伴う問題も否定できない。しかし要求される精度から見て、著しくバランスを欠くものではないと考える。

仮定 2. s 地域の産業資本 K_j^s は全額その地域の家計によって保有される。資本所得への税率 (配当税率) τ_K^s , 賃金所得への税率 (所得税率) τ_L^s は産業部門によって異ならず, 各期に外生的に与えられる。また域外からの純資本流入 TR^s は家計には入らない。

本モデルでの所得移転は, ODA や FDI や海外債券市場への間接投資を含む地域間の移転であって, 社会保障に代表される世代間の移転ではないと考える。このとき家計部門の可処分所得は以下のように定義される。

$$W_D^s = (1 - \tau_K^s) \sum_j \rho_j^s K_j^s + (1 - \tau_L^s) \omega^s \sum_j L_j^s \quad (19)$$

家計が可処分所得 W_D^s を今期消費と貯蓄に振り分けるためには, 貯蓄率 σ^s が必要である。本来貯蓄率は, 将来消費流列の割引現在価値の最大化によって内生的に定められるべきであるが, ここでは予見の問題に立ち入ることを避けるため, 単純に地域別・期別に外生的に与えられるとする。¹⁶ このとき地域 s の家計消費支出額 W_1^s は, 以下の式で与えられる。

$$W_1^s = (1 - \sigma^s) W_D^s \quad \dots\dots\dots (20)$$

家計は (20) 式を予算制約として, 今期の効用を最大にするような財消費と CO_2 排出量の組み合わせ (y_{i1}^s, E_{W1}^s) を決定するが, 産業の場合と同じようにエネルギー消費に対する家計部門の CO_2 排出原単位を b_{e1}^s とおくと, $E_{W1}^s = b_{e1}^s \sum_r y_{31}^{rs}$ と書けるから, 家計の問題は以下になる。

$$\max_{y_{i1}^s} U^s = \prod_i \left(\sum_r y_{i1}^{rs} \right)^{\beta_{i1}^s} (b_{e1}^s \sum_r y_{31}^{rs})^{\beta_{E1}^s} \dots (21)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_i q_i^s \sum_r y_{i1}^{rs} + \theta^s (b_{e1}^s \sum_r y_{31}^{rs}) \leq W_1^s \quad (22)$$

生産関数の場合と同様に, 家計の CO_2 排出量に関する導関数 $\partial U^s / \partial E_{W1}^s > 0$, 従って $\beta_{E1}^s > 0$ を仮定する。財消費が同じならば, CO_2 を多く出す場合の方が効用は高いと考えられるからである。¹⁷ いま (22) 式に付随する Lagrange 乗数を λ^s とすれば, 家計の問題の 1 階条件は以下のように得られる。

¹⁶ 貯蓄率は利子率の増加関数であると考えるのが一般的である。利子率は資本の限界生産性に対応するので, 貯蓄率を資本レント ρ^s の関数として表現することができる。さらに日本のように少子高齢化が進む場合には貯蓄率は時間と共に減少し, 借入金が多い場合には増加するので, 人口コホートや資本収支を加味すれば, 適用期待 (adaptive expectations) の範囲でも実際的な関数表現が可能である。

¹⁷ 家計は CO_2 排出の直接費用しか考慮しないとしているが, 大気圏全体の CO_2 蓄積に伴う間接費用 (たとえば平均気温上昇に伴う熱帯性疾病の影響などの外部性) を, 先決内生変数の形で効用関数に組み込むことは可能である。

$$\begin{aligned} \frac{\beta_{i1}^s U^s}{\sum_r y_{i1}^{rs}} - \lambda^s q_i^s &= 0 \quad (i \neq 3) \\ (\beta_{31}^s + \beta_{E1}^s) \frac{U^s}{\sum_r y_{31}^{rs}} - \lambda^s (q_3^s + \theta^s b_{e1}^s) &= 0 \quad (i = 3) \end{aligned}$$

ここで効用関数の指数に関しても (10) 式と同様の 1 次同次性の仮定,

$$\sum_i \beta_{i1}^s + \beta_{E1}^s = 1 \quad \dots\dots\dots (23)$$

を設けると, λ^s は s 地域の支出の限界効用 (U^s / W_1^s) に等しくなる。このとき, 上の 1 階条件は以下のように書き直せる。

$$\begin{aligned} \beta_{i1}^s &= \frac{q_i^s \sum_r y_{i1}^{rs}}{W_1^s} \quad \text{and} \\ \beta_{31}^s + \beta_{E1}^s &= \frac{(q_3^s + \theta^s b_{e1}^s) \sum_r y_{31}^{rs}}{W_1^s} \quad \dots\dots\dots (24) \end{aligned}$$

従って企業と同様に, 家計もエネルギー財の使用に当たって財価格と排出権価格の合計を見て行動する。

5.3 貯蓄と投資

本モデルでは最終需要部門として, 家計以外に投資 (固定資本形成) と政府消費の 2 種類を考える。いま産業・政府部門における内部留保がないと仮定すれば, s 地域は貯蓄率 σ^s の下で $S^s = \sigma^s W_D^s$ だけの貯蓄を行う。なおここに言う貯蓄は, フローとしての貯蓄純増でありストックとしての貯蓄残高ではない。投資の原資は貯蓄であるが, 投資は企業のみならず政府によっても行われる。¹⁸ 本モデルの投資には公的資本形成 (道路・護岸など) が含まれることを念頭に, 貯蓄と投資の関係を Fig.4 を用いて整理する。

以下では説明を簡単にするため, s 地域は十分に大きくて貯蓄に関して閉じているとする。このとき, 今期の貯蓄 S^s は今期の民間投資 $I^s (= \sum_i I_i^s)$ と政府投資 I_G^s に使われる。一般に政府投資の原資は国債 B^s として調達されるが, これは貯蓄の 1 形態である。貯蓄のうち国債に振り向けられる比率を ν_B^s とすると, 民間投資に用い得る部分は $I^s = (1 - \nu_B^s) S^s$ である。本来, 国債は投資的経費にのみ用いられるべきだが, 実際には財政赤字を補填するためのいわゆる「赤字国債」も無視できない。一方, 政府投資が全額国債で賄われる訳ではなく, 一部は税收 T^s が充たさ

¹⁸ 日本の国民経済計算では, 消費は家計, 対家計民間非営利団体と政府の 3 区分, 投資も民間企業設備, 民間住宅資本, 公的企業設備, 公的住宅資本と一般政府資本の 5 区分で表章される。しかし WDI 等の国際統計では, 民間消費・投資・政府消費の 3 区分が一般的であり, 投資には民間投資と政府投資の双方が含まれる。国営企業の存在を考えれば, 組織としての政府投資は生産設備を含む可能性があるため, 組織による区分より目的による区分の方が望ましいと考えられる。

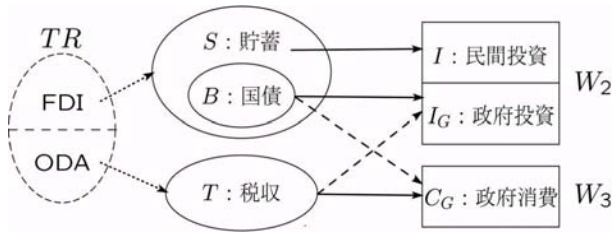


Fig. 4 Funding of capital formation and government expenditure.

れる。このため単純に、

$$S^s = I^s + I_G^s \quad \text{and} \quad T^s = C_G^s$$

とは書けないが、本モデルではFig.4に点線で示す流れは存在しないものと仮定し、最終需要項目としての前者を W_2^s 、後者を W_3^s と書く。

仮に貯蓄＝投資を仮定したとしても、実際には s 地域でなされた貯蓄が s 地域に再投資されるとは限らないし、地域のマクロバランスを保つためには、貿易赤字(黒字)に等しいだけの資本流入(流出)が必要である。 s 地域外からの資本流入は、 s 地域資本市場への間接投資、海外直接投資(FDI=Foreign Direct Investment)、経済援助(ODA=Official Development Assistance)などの形態をとる。本モデルでは、純資本流入 TR^s は W_2^s と W_3^s のみに配分されると仮定する。間接投資の場合は必ずしも資本形成に直結しないが、資本市場における企業の資金調達を容易にすることを通じて、資本形成に寄与すると考えられる。またODAの一部は民間部門に回るが、ここでは100%政府部門に回るものと見なす。

ODAが政府消費と政府投資に配分されることに注意して、純資本流入のうち政府部門への配分率が ν_P^s 、そのうち消費への配分率を ν_G^s と表すと、投資と政府消費の最終需要項目は以下のように書ける。

$$W_2^s = S^s + (1 - \nu_G^s \nu_P^s) TR^s \quad \text{and} \\ W_3^s = T^s + \nu_G^s \nu_P^s TR^s \quad (TR^s \geq 0) \quad \dots\dots\dots (25)$$

純資本流入がマイナスになる場合も、その原資は貯蓄および税収から供給されると考え、その配分率がやはり ν_P^s で与えられるとするならば、(25)で $\nu_G^s = 1$ と置いた式が適用できる。税収は地域内では全額政府消費に用いると仮定するためである。

s 地域における投資額 W_2 が定まれば、それを産業投資と公共投資に配分し、さらに前者は各産業部門に配分する必要がある。¹⁹ 公共投資への配分は、各

¹⁹ 民間投資のうち、住宅投資の占める部分は無視できない。2000 暦年の実質ベースでは日本の民間資本形成は企業設備が 79.9 兆円、住宅が 20.3 兆円で、住宅が約 20% を占める。しかし住宅がすべて借家であると解釈すれば、住宅

地域の財政規模などに応じて決まる比率 ν_B^s を適用して、 $I_G^s = \nu_B^s W_2^s$ で与えられ、残りが民間投資に振り向けられる。産業部門への配分は、基本的には前期の資本レント $\rho_{i(-1)}^s$ の関数になると考えて差し支えない。たとえば既存資本量と資本レントに関する Logit モデルを用いて、

$$I_i^s = \frac{K_{i(-1)}^s \exp(\gamma \rho_{i(-1)}^s)}{\sum_i K_{i(-1)}^s \exp(\gamma \rho_{i(-1)}^s)} (1 - \nu_B^s) W_2^s \quad \dots (26)$$

などとして考えられる。ここに $K_{i(-1)}^s$ の項は追加・更新投資部分を表現し、括弧内は新規投資機会を表現する。

本モデルにおける準動学性は、資本蓄積と大気内の CO_2 蓄積を通じて表現され、このうち前者は経済活動モデル内で完結する。産業別資本と公共資本は、それぞれの資本減耗率 (δ_i, δ_G) を用いて、以下のように計算される。²⁰

$$K_i^s = (1 - \delta_i) K_{i(-1)}^s + I_i^s \quad \text{and} \\ K_G^s = (1 - \delta_G) K_{G(-1)}^s + I_G^s \quad \dots\dots\dots (27)$$

5.4 排出権と排出権価格

4. で述べたように、 CO_2 排出の捉え方には資源側と需要側の2通りが可能であるが、本モデルでは消費部門での排出削減を重視するために後者の考え方を採る。資源側で捉える場合には、その生産財を消費することに伴う最終需要部門での排出量に対する排出権価格も、生産段階で上乗せして支払うことになるため、需要側での排出を直接捉えることが難しくなる反面、産業連関表の枠組み上は通常の間接税と同様の扱いが可能である。しかし資源側と需要側の双方をエネルギー部門として扱うことは、排出権価格の2重計算等の問題を生じる。

産業と家計の定式化において各部門に割り当てられる排出量の和は、 s 地域に割り当てられた総排出割当量 E^s を超えてはならない。すなわち、

$$E^s \geq \sum_j E_j^s + \sum_{j'} E_{Wj'}^s \quad \dots\dots\dots (28)$$

E^s は排出権取引後の排出割当量であって、経済が効率的ならば実際の排出量に等しい。たとえば地域政府が排出権を独占的に管理しており、個々の企業・家計は排出権を政府から購入するならば、その代金 $\theta^s E^s$ は地域政府の収入となる。地域政府は必要な排

投資は不動産サービス業の投資に含めて考える得る。ただし国営企業が存在により、民間投資と政府投資という区分は必ずしも適切でないため、ここでは産業投資と公共投資と呼称する。

²⁰ 公共インフラの減価償却率は企業のそれよりも低いと考えられるため、一般に $\delta_G < \delta$ である。

出権を国際市場から購入し、余剰分を売却する。余った金額は政府消費の原資として使うことができると考える。排出権の国内価格は、必ずしも国際価格に等しいとは限らないため、地域別価格 θ^s で評価している。²¹従って E^s は、世界政府によって地域(国)別に指定される排出権量 $\bar{E}^s$ とは異なることに注意する必要がある。

これは一種の所得移転だと考えることもできる。 $E^s > \bar{E}^s$ の場合、 s 地域は $\theta(E^s - \bar{E}^s)$ に等しい排出権を購入する必要があるが、これは資本流出の一種だと考えられる。いま金額ベースで評価した純輸出額を $NX^s = (\text{輸出} - \text{輸入})$ とし、所得移転 TR^s の流入側を $\oplus$ で表すと、

$$TR^s = -NX^s - \theta(E^s - \bar{E}^s), \sum_s (E^s - \bar{E}^s) = 0 \quad (29)$$

であって、世界全体での排出量は総排出枠に等しくなければならない。貿易黒字を持ち排出権が不足する地域では所得移転は $\ominus$ になり、貿易赤字を持ち排出権が余る地域では $\oplus$ になる。²²

CO₂排出権を各地域にどのように割り当てるかは世界政府の役割であり、地域経済への所得配分上重要な意味を持つ。Uzawa (2003)の**Proposition 7**を引用すれば、「Lindahl条件を満足する排出権取引市場の均衡は、世界全体での排出枠 $\bar{E}$ を各国のGDPに比例的に配分する場合に厳密に一致する。」本モデルのような準動学的枠組みでは、排出権割当とGDPを同時決定することは困難であり、また現実的でもないため、各期に各地域に配分される排出枠は、その地域の前期のGDPに粗付加価値(排出権支払い相当分を除く)に比例的であると考えられる。すなわち、 $Y^s = \sum_j (V_j^s - \theta^s E_j^s)$ として、

$$\bar{E}^s = \frac{Y_{(-1)}^s}{\sum_s Y_{(-1)}^s} \bar{E} \dots\dots\dots (30)$$

各年における排出量の総枠は、世界政府によって政策的に決定される。なおCO₂排出に関して *laissez faire* 政策を採る場合には、 $\bar{E} = \infty$ と考えればよく、排出権は自由財となるから、その国際価格は $\theta = 0$ である。その場合でも、個別の地域が独自の排出枠 $\bar{E}^s$ とその価格 θ^s を定めることは可能である。²³

²¹大気中のCO₂濃度は公共財であるが、その水準に対する支払い意思額は地域によって異なるのが自然である。Uzawa (2003)はLindahl均衡の概念を適用して、 $\theta E^s = \theta^s E$ となるように、地域別価格を定めることがPareto最適となることを示している。ここに (θ, E) は、それぞれ排出権の国際価格、世界全体での総排出枠を意味する。

²²たとえば広大な熱帯雨林を持つ途上国に排出権を多く割り当てれば、余剰分を売却して収入を得ることができから、従来のODAの一部を代替するものとなり得る。

²³排出枠は年率1%削減・2%増加など、シナリオとして

本稿ではエネルギー財を需要側(電力・ガソリン等の直接使用可能な形態)で記述しており、エネルギー資源は鉱業を含む分類である(2)製造業に対する供給量の一部に含まれることになる。従って、この部門は生産可能財と生産不可能財を併せて含む形になるが、石油採掘にしても種々の設備や労働力を投入して初めて可能になるから、生産関数を定義することは可能である。しかしエネルギー資源(石油・石炭・天然ガス等)の枯渇の問題を扱う場合には、エネルギー財を資源側で考える方が直接的であろう。²⁴

5.5 政府

世界政府の役割は排出権の総枠 $\bar{E}$ を決定し、それを地域別に割当て、排出権取引が適正に行われることを監視することであった。従って世界政府自体は何の資源も必要とせず、収益を上げ、または損失を蒙ることはないものと想定されている。しかし地域政府は、税金を集めそれを政府消費に用いる以外に、国債を発行して公共投資を行い、排出権価格に相当する環境税を徴収し、排出権の過不足を国際的な排出権市場を通じて調整する。

s 地域のCO₂総排出量は(28)式で与えられるから、政府の環境税収入はこれに(地域内)排出権価格 θ^s を乗じたものになる。従って法人税・所得税を加えた政府の地域内からの税収は、次式で与えられる。

$$T^s = \tau_K \sum_j \rho_j^s K_j^s + \tau_L^s \sum_j L_j^s + \theta^s E^s \dots (31)$$

排出権の過不足は地域間所得移転を通じて調整されると考え、政府は調整が円滑に行われることを監視する役割に留まるものとする。²⁵政府は、これ以外に国債による借り入れと資本流入のうちODAに相当する部分を用いて、政府消費 W_3^s と公共投資 I_G^s を行う。**5.3**の議論から、これらは以下のように書ける。

$$W_3^s = T^s + \nu_G^s \nu_P^s TR^s \quad \text{and} \\ I_G^s = \nu_B^s (S^s + (1 - \nu_G^s \nu_P^s) TR^s)$$

外部から与えることが一般的であり、同様のシナリオを地域別・部門別に設定することも可能である。本モデルでは、水災害による経済活動の意図しない縮小を考慮するため、必ずしも(28)式が等号で成立するとは限らないことに注意されたい。

²⁴Nordhaus *et al.* (2000)では資源埋蔵量の減少と共に「売り惜しみ」が生じ、それによる供給不足分が価格に反映するような定式化がなされている。

²⁵ s 地域に割当てられた排出権の国際価格で評価した価値 $\theta \bar{E}^s$ は、その期の地域経済に対する初期賦存量に相当する。過不足調整を地域政府が独占的に行う場合には、環境に関する収支は、 $TE^s = \theta^s E^s - \theta(E^s - \bar{E}^s)$ で与えられる。しかし排出権取引分を税収に算入すると、仮定により全額が政府消費に回ることになる。

ここに政府消費・公共投資共に地域に関して閉じていると仮定している。現実には外貨建て国債による資金調達や他地域へのODAを通じた投資もあるが、これらは純資本流動 TR^s に計上されるからである。

政府消費や公共部分を含む投資に伴う財の調達には固有のパターンがあり、財の種類に関して家計消費より代替が生じにくい構造になっている可能性がある。特に投資は固定資本形成であり、それに必要な建設資材や機械を他で代替することは技術的に困難である。従って、その財別支出比率を表す係数 β_{ij}^s ($j' = 2, 3$)についても固有のパターンが維持されると考えられる。

ここでは効用最大化や費用最小化問題を經由することなく、産地別・財別需要量 y_{ij}^{rs} に関して、(24)と同様の関係が $j' = 2, 3$ についても成り立つとする。エネルギー財の消費に関して、排出権価格の負担を含む1次同次性の条件(23)が援用される。

公共投資には道路・港湾などの交通施設や上下水道・図書館などの環境・文化施設が含まれるが、堤防や貯水池などの治水・利水施設も重要な位置を占める。**3.**の定式化では、洪水や渇水の発生する水深の閾値($h_u(m), h_\ell(m)$)をメッシュ別に定め、生産活動の阻害率 $\phi_j(m, t)$ を計算しているが、メッシュ単位の公共資本量 $K_G(m, t)$ は閾値を上げる効果を持つ。すなわち $\partial\phi(m, t)/\partial K_G(m, t) < 0$ であるから、 $\phi(K_G(m, t), m, t)$ のように $K_G(m, t)$ の関数として定式化し、(16)式に用いれば、公共資本の防災効果を明示的に算定することが可能である。

本モデルでは洪水・渇水の影響を生産阻害効果に限定しているが、洪水時の住宅被害は住民の効用に大きく影響する。これは住宅サービスに関する資本 K_5^s の減失(ストック効果)を考慮することで表現できる。結果的に住宅サービスの供給減少と価格上昇を招き、消費可能量が減少することを通じて住民の効用低下をもたらす。

5.6 地域間交易と価格

前節まで、経済活動モデルに含まれる個別主体の行動に関するモデルを一通り記述した。そこでは中間財と最終需要財の交易量、 $(x_{ij}^{rs}, y_{ij}^{rs})$ が主要な変数となるが、基本的に財は産地によらず完全代替的であるとされるため、個別部門の行動として産地ごとの財需要量を定めることはできない。ここでは本モデルにおける財交易と資本流入の扱いに関して、産業連関表の枠組みに即して概略を記述する。

(13)式から、Cobb-Douglas型生産関数の指数 α_{ij}^s は金額表示の地域別投入係数に他ならない。分子・分母をそれぞれの価格で割ると物量表示の投入係数 a_{ij}^s が得られる。すなわち $a_{ij}^s = \sum_r x_{ij}^{rs}/X_j^s$ であるか

ら、金額表示と物量表示の投入係数の間には以下の関係が成り立つ。

$$a_{ij}^s = \frac{p_j^s}{q_i^s} \alpha_{ij}^s \dots\dots\dots (32)$$

また財の交易に関して、非競争輸入の仮定を設ける。

仮定3. i 財の産地別購入割合は中間需要・最終需要に拘らず s 地域固有のパターン t_i^{rs} に従う。

このとき s 地域の i 財需要量は、

$$x_{ij}^{rs} = t_i^{rs} a_{ij}^s X_j^s \quad \text{and} \quad y_{ij}^{rs} = t_i^{rs} \beta_{ij}^s W_{j'}^s / q_i^s \dots\dots (33)$$

と書ける。 t_i^{rs} は交易係数であり、以下のHarker (1987)型のポテンシャル関数で定式化されるとする。

$$t_i^{rs} = \frac{X_i^r \exp(-\lambda_i(p_i^r + c_i^{rs}))}{\sum_r X_i^r \exp(-\lambda_i(p_i^r + c_i^{rs}))} \dots\dots\dots (34)$$

ここに c_i^{rs} は i 財を r 地域から s 地域に1単位運ぶ場合の運賃、 $\lambda_i > 0$ は財に固有のパラメータである。(34)式は、産地別購入割合が産地の生産規模に比例し、c.i.f. 価格に逆相関することを意味する。²⁶

交易係数を用いて、 r 地域産の i 財の物量表示の販路構成は以下のように書ける。

$$X_i^r = \sum_s t_i^{rs} [\sum_j a_{ij}^s X_j^s + \sum_{j'} \beta_{ij'}^s W_{j'}^s / q_i^s] \dots\dots (35)$$

このうち $s = r$ を除いた和が輸出分に相当する。

$$F_i^r = \sum_{s \neq r} t_i^{rs} [\sum_j a_{ij}^s X_j^s + \sum_{j'} \beta_{ij'}^s W_{j'}^s / q_i^s]$$

これを金額表示する場合は、両辺にf.o.b. 価格 p_i^r を掛けてやればよい。一方、輸入分は r 地域を着地とする和で表現されるから、次式で与えられる。

$$M_i^r = \sum_{s \neq r} t_i^{rs} [\sum_j a_{ij}^r X_j^r + \sum_{j'} \beta_{ij'}^s W_{j'}^s / q_i^r]$$

s 地域産の財は $(p_i^s + c_i^{sr})$ で評価する必要があることに注意すると、 r 地域 i 財に関する金額表示の純輸出額は以下のように書ける。²⁷

²⁶安藤他(1996)では、運輸部門を財需要に伴う派生需要としての貨物輸送を行う独立の部門として扱っている。本モデルの産業分類では運輸はサービス部門に包含されるため、その内数としての扱いとなる。運賃発払いを仮定すれば、 r 地域運輸業の総運賃収入は、サービス業の総売上げ以下でなければならないので、 $(x_{ij}^{rs}, y_{ij}^{rs})$ が以下の条件を満たすことを確かめる必要がある。

$$\sum_i \sum_s c_i^{rs} (\sum_j x_{ij}^{rs} + \sum_{j'} y_{ij'}^{rs}) \leq p_5^r X_5^r$$

²⁷(36)式は輸入品価格に含まれる輸送費を輸入額に含めて表記しているが、産業連関表では輸送費部分は運輸サービス業からの投入として別掲するのが一般的である。その場合は、(36)式の第2項の括弧内を p_i^s だけにし、 c_i^{sr} 相当部分をサービス業に迂回計上すればよい。

$$NX_i^r = p_i^r \sum_{s \neq r} t_i^{sr} [\sum_j a_{ij}^s X_j^s + \sum_{j'} \beta_{ij'}^s W_{j'}^s / q_i^s] - \sum_{s \neq r} (p_i^s + c_i^{sr}) t_i^{sr} [\sum_j a_{ij}^r X_j^r + \sum_{j'} \beta_{ij'}^r W_{j'}^r / q_i^r] \quad (36)$$

$NX^s = \sum_i NX_i^s$ と排出権取引を使うと、(25)の投資・政府消費の詳細を以下のように書くことができる。

$$W_2^s = \sigma^s \{ (1 - \tau_K^s) \sum_j \rho_j^s K_j^s + (1 - \tau_L^s) \omega^s \sum_j L_j^s \} - (1 - \nu_G^s \nu_P^s) (NX^s + \theta (E^s - \bar{E}^s)), \dots \quad (37)$$

$$W_3^s = \tau_K^s \sum_j \rho_j^s K_j^s + \tau_L^s \omega^s \sum_j L_j^s + \theta^s E^s - \nu_G^s \nu_P^s (NX^s + \theta (E^s - \bar{E}^s)). \dots \quad (38)$$

なお世界全体では、 $\sum_s NX^s = \sum_s (E^s - \bar{E}^s) = 0$ であるから、地域に関する和を取ると(37)、(38)の最後の項は消えることに注意されたい。 s 地域のGDPは(18)式から、 $V^s = \sum_j \rho_j^s K_j^s + \omega^s \sum_j L_j^s + \theta^s E^s$ と書けるから、

$$W^s - V^s = -NX^s + \theta (\bar{E}^s - E^s) = TR^s \dots \quad (39)$$

すなわち最終需要額とGDPの差を賄うために資本流入が必要であり、その額は貿易赤字と排出権売却額の和に等しいことが確かめられる。

最後に市場価格 q_i^r を定義しておく。 r 地域で需要される i 財の量は、 $\sum_j a_{ij}^r X_j^r + \sum_{j'} \beta_{ij'}^r W_{j'}^r / q_i^r$ であるが、その金額は域内輸送費 c_i^{rr} を含めて、

$$D_i^r = \sum_s (p_i^s + c_i^{sr}) t_i^{sr} [\sum_j a_{ij}^s X_j^s + \sum_{j'} \beta_{ij'}^s W_{j'}^s / q_i^s]$$

で表される。ここで、 r 地域の市場価格は各地域産財の加重平均価格に等しい、

$$q_i^r = \sum_s (p_i^s + c_i^{sr}) t_i^{sr} \dots \quad (40)$$

と仮定すれば、上式は以下のように簡潔に書ける。

$$D_i^r = q_i^r \sum_j a_{ij}^r X_j^r + \sum_{j'} \beta_{ij'}^r W_{j'}^r \dots \quad (41)$$

5.7 モデルに含まれる諸変数

本モデルの計算にとって必要とされる主要な外生変数としては、地域別労働人口 L^s 、地域別排出権割当 $\bar{E}^s$ と、先決内生変数としての地域別産業別資本量 K_j^s がある。本モデルにおける交易パターンは(34)式によって決まるが、この式は地域別・財別の生産量と価格を必要とする。これらの値をモデルの均衡計算と同時決定することは理論的には不可能ではないが、右辺には $(X_{i(-1)}^r, p_{i(-1)}^r)$ を先決内生変数として用いることが現実的であると考えられる。また $\bar{E}^s$ を(30)式によって割り当てる場合は、前期の付加価値額 $V_{(-1)}^s$ を先決内生変数として用いる必要がある。

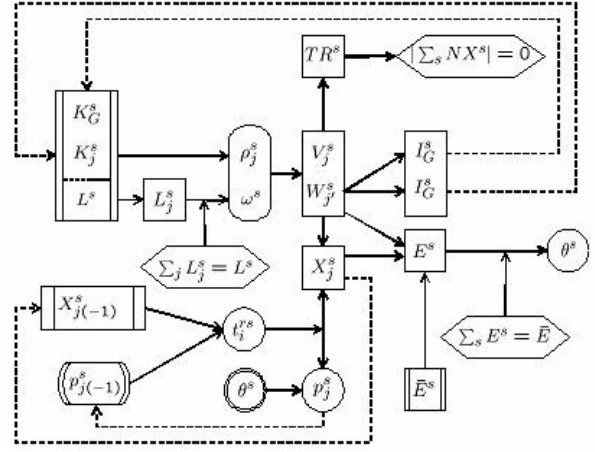


Fig. 5 Relationship among variables in a single simulation cycle.

主要な内生変数のうち、実物変数には地域別産業別の労働人口 L_j^s 、生産量 X_j^s 、付加価値額 V_j^s 、地域別の最終需要項目 $W_{j'}^s$ 、移転所得額 TR^s 、排出量割当 E^s があり、価格変数には地域別賃金 ω^s 、地域別産業別資本レント ρ_j^s 、f.o.b. 価格 p_j^s 、排出権国際価格 θ がある。なお地域別の排出量 E^s と排出権価格 θ^s の内生変数指定は代替的であって、政府が θ^s を外生的に決めると E^s が内生的に求まり、逆に目標となる E^s を定めるとそれを達成する θ^s が内生的に求まる。²⁸

これらを決定するための主要な関係式は以下のようである。 ρ_j^s と L_j^s はそれぞれ(15)の第1式と第2式から、 ω^s は労働市場の均衡条件 $\sum_j L_j^s = L^s$ から定まる。また付加価値額 V_j^s が(17)式、最終需要項目 $W_{j'}^s$ は(20)、(37)、(38)式からそれぞれ求められると、移転所得額 TR^s は(39)式から自動的に決まる。モデルの核心部分である財と価格の均衡は地域内では完結しない。生産量 X_j^s に関しては、財の取引を含む産出体系の(35)式を連立して解く必要がある。 X_j^s が得られれば、中間需要に関する1階条件(13)または(14)により、地域別財別価格 p_j^s を定めることができる。²⁹Fig.5は本モデルに含まれる主な変数間の関連を模式的に示したものである。

通常この種のモデルでは、Walras条件により地域別財別価格(要素価格を含む)の任意の1個をニューメーラールにすることが一般的である。しかし孟・安藤(2004)に述べるように、地域間の単位あたり輸送費 c_i^{rs} を金額で与える場合には、すべての価格は輸送費を単位として定まることになる。またモデル内に

²⁸ むしろ地域政府が一切の政策的介入を止めると $\theta^s = \theta$ となって、 E^s は内生的に定まるが、経済学的にはこれが最も効率的である。

²⁹ 生産関数が1次同次の場合、産業連関表の価格体系は(10)式に帰着するため、新たな条件式は得られない。

(34)のような確率的な式を含む場合には、一般均衡は近似的にしか成立せず、若干の収束誤差が残る。本モデルの場合、均衡計算は $|\sum_s NX^s|$ に関する最小化問題として定式化可能である。

本モデルにはこの他にも多くのパラメータが含まれる。たとえば産業連関表から観察される投入係数 α_{ij}^s や最終需要支出比率 β_{ij}^s 、CO₂排出原単位(a_{ej}^s, b_{ej}^s)などがある。これらの値は生産関数や効用関数の変形に伴って変動するから、これらのパラメータを動かすためには、将来的に生産技術や環境技術がどう変化するかに関する予見が必要とされる。同様に、貯蓄率 σ^s は現在と将来の消費に関する異時点選択の結果定まるから、これを内生化するためには家計の将来予見が不可欠である。一方、本モデルでは税率(τ_K^s, τ_L^s)を外生的に与えて財政支出を内生的に定める方針を採っている。逆に財政規模を外生的に与えれば、そのような財政を支えるために必要な税率を内生化することは可能であるが、一般に「小さな政府」が好まれるとすれば、後者の方法は余り適切ではないと考えられる。

6. 流出モデルの概要

本モデルは2.で述べたように、気候変動モデルと組み合わせ用い得る経済活動モデルを提案するものである。後者の出力であるCO₂排出量は直接前者の入力となるが、前者の出力である降水量はそのままの形で用いることができず、流出モデルを介してメッシュ単位の水深に変換される必要がある。ここでは本モデルが前提とする流出モデルの概要について述べる。

Simonovic (2000) は、Meadow *et al.* (1974) の全球レベルの社会経済システムを対象とするシステムダイナミクス(SD)モデル(World3)に水資源を導入し、World Waterモデルを開発した。しかし水資源として利用可能な水は、地球全体の水の総量の1%にも満たず、その空間的・時間的な偏在が問題視される。また水質は極めて局所的な問題であるから、水資源の過不足を全球レベルで分析しても、問題の解決には余り役立たないと考えられる。

そこでNakatsuka (2004) は、World Waterモデルを大陸レベルの6地域に分割したSDモデル(World Continental Water model)を構築した。モデルは社会経済システムを、人口・資本・農業・枯渇性資源・汚染蓄積・水量・水質の7つのサブモデルにより記述し、移民と交易で大陸間の関係を捉える。また地球温暖化に関しては、Hadley CentreによるGCM(Johns *et al.*, 1997)の出力値を固定的に用いている。

モデルの意図は本モデルとさほど変わらないが、

個々の主体の行動も、それを調整する価格メカニズムも含まれないため、いわゆる“over shoot”(過剰な経済活動)が生じる可能性が高く、原油価格の上昇や排出権取引が経済活動に及ぼす影響を分析するには適さない。これが本モデルがSCGEの枠組みに依拠する理由である。しかし一方で、SCGEが考慮できるのは経済活動の範囲に限定されるため、洪水・渇水の発生を含む水循環に関する分析は外部のモデルに委ねる必要がある。

洪水・渇水の発生や被害状況を予測するためには、追跡可能な解像度で流域を捉えて解析し、観測値と比較してモデルの有効性を検証する必要がある。しかし降水量の解像度はGCMの300kmメッシュに支配され、全球レベルでの河川流量データ入手も現実的ではないため、十分な精度で河川流出計算を行うことはできない。このような場合、GCMの値を境界条件にしたRCM (Regional Circulation Model) によって力学的に、もしくは過去の観測値に基づいて統計的にダウンスケールすることが一般的であるが、経済モデルの解像度を考えると、データセットを流出計算のスケールに合せるのとは別の方策が必要になる。

本研究では、GTOPO30(全球30秒標高データセット)³⁰から各メッシュの平均標高を求め、隣接する4メッシュのうち最急勾配の方向に流路を定めることを原則とする。³¹Fig.6が作成された流路網であり、流出方向は矢印で示される。

降水の一部は氷雪の形で蓄えられ、時間的遅れを伴って流出する。また蒸発散や浸透相当部分を差し引く必要があるが、地表水として流出する部分に関しては、一般的な水収支のモデルが適用できる。すなわち地表面水量 $Q(\text{mm})$ は、

$$\left. \begin{aligned} dQ/dt &= I - O \\ I &= Pr + Q_{in} \\ O &= Ea + Q_{out} \\ Q_{out} &= Q(v/\ell) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (42)$$

で算定される。ここに、 I : 流入量、 O : 流出量、 Pr : 降水量、 Ea : 実蒸発散量、 Q_{in} : 上流メッシュからの流入量、 Q_{out} : 下流メッシュへの流入量(以上mm/day)、 v : 流下係数、 ℓ : メッシュ内流路長(m)である。

流出モデルに要求される情報は、年間に占める洪水・渇水の発生時間比率であり、細かい時間解像度

³⁰Global 30 Arc Second Elevation Data Set <http://www1.gsi.go.jp/geowww/globalmap-gsi/gtopo30/gtopo30.html>

³¹ここでは、陸域が30%以下のメッシュについては海(カスピ海等を含む)であるとし、窪地や不連続な落水線が生じる場合は、当該メッシュを隣接4メッシュのうち最も標高の低いものより1m高くして最急勾配方向を定め、全ての流線が海に達するように設定する。

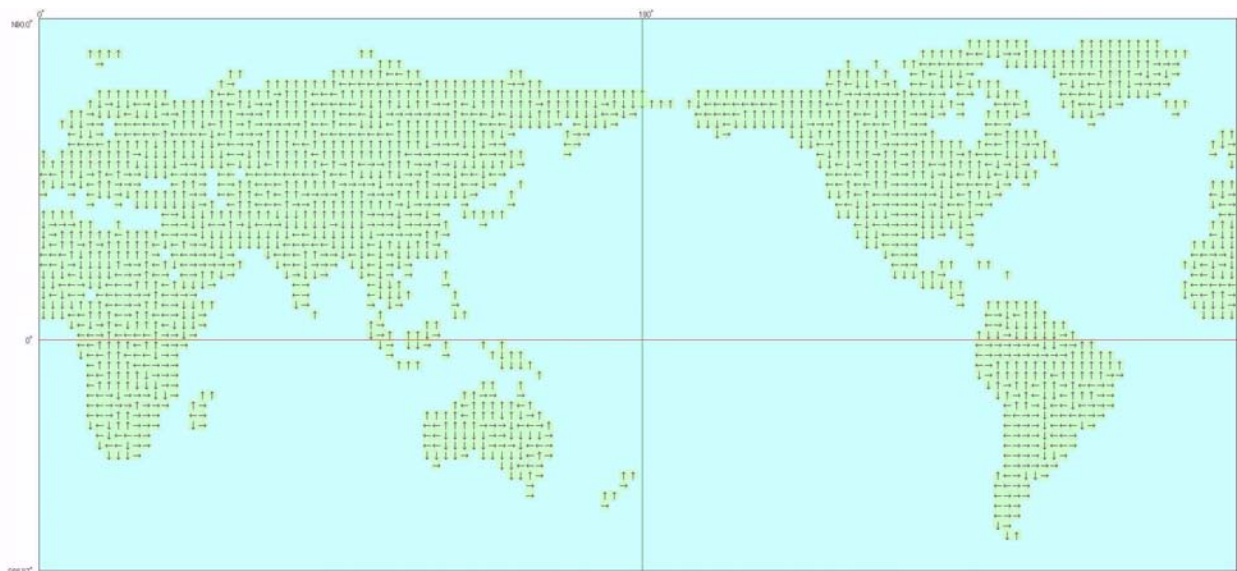


Fig. 6 The map of flow direction.

は必要とされないため、流出計算のタイムステップは1日で十分であろう。閾値の設定については、1960年から2000年の41年の各メッシュ内日水量が上位 x_h % 水位を洪水水位、下位 x_l % 水位を渇水水位とする。³²流量計算は経済活動と直接関係なく実行できるが、洪水・渇水が意味を持つのは経済活動が行われている領域で発生した場合ある。従って2.の経済活動が営まれる標高閾値 h に関して、 $\rho(m, h) > 0$ となるメッシュ m についてのみ判定を行えば足りる。

7. おわりに

地球温暖化問題を分析するためには、気候と経済の間のフィードバックが考慮されるべきである。本稿は気候変動モデルと対話的に実行されることを想定した、経済活動モデルを提示することを目的とするものである。モデルは全体としてリカーシブ動学モデルを構成するが、両モデルの統合に当たって最初に問題となるのは、空間的・時間的解像度の相違である。すなわち気候変動モデルの計算は300kmメッシュ・時間単位で進行するのに対し、経済活動モデルは大陸レベルの大地域・年単位を基本とする。そこで2.では、気候変動モデルと経済活動モデルの空間解像度の違いをインターフェイスするための補助モデルについて、基本的な考え方を示した。

経済活動モデルから得られる地域別CO₂排出量は、補助モデルを用いてメッシュ単位に変換される。

³²CCSR/NIES CGCM による20世紀再現実験計算(1960-2000)の気温と降水量から判定基準を作成し、IPCC(2000)のA1Bシナリオによる計算結果を用いて洪水・渇水の判断を試行した。

気候変動モデルからはメッシュ単位の気温や降水量が得られるが、その経済活動への影響は直接的ではない。3.では、経済活動モデルにおいて気候変動の影響を考慮する範囲を特定した。メッシュ単位の降水量は流出モデルを通じてメッシュ単位の水深に変換され、時間解像度の調整を通じてメッシュ単位の洪水・渇水状況に変換される。それを大地域レベルで集計して初めて、経済活動モデルへの反映が可能となる。なお流出モデルの概略は6.で紹介している。

本稿の経済活動モデルの枠組みは、地域産業連関モデルをベースとするSCGEモデルに依拠している。全世界を対象とする経済モデルのためのデータソースとしては、WDIとGTAPがある。そこで4.では、本モデルにおける産業分類と地域区分について論じた。具体的には時系列データの利用可能性から、WDIの大地域7分類に所得水準を加味した9地域区分を採用する。産業分類もWDIの4部門を基本とするが、地球環境問題におけるエネルギー部門の重要性に鑑み、当該部門を独立させた5部門としている。ただし生産技術や支出構成に関しては、GTAPから得られる地域別産業連関表を用いる。

5.では、企業・家計・政府の各主体別の行動と市場均衡条件を定式化した。本稿では、消費部門でのCO₂の排出削減を重視する立場から、エネルギー部門を需要側で定義し、排出権を一種の生産要素として扱う。世界政府は排出権の総枠を地域別に割り当て、地域政府は独自に排出枠を定めて過不足を排出権取引を通じて調整するが、地域政府はそれ以外に徴税と国債発行を通じて政府消費と公共投資を行う。本モデルは、民間産業資本・公共資本の蓄積とCO₂の環境への蓄積に関して準動学的である。

以上のように本稿では、地球温暖化問題分析のためのリカーシブ動学モデルの全体構成と、その主要部分である経済活動モデルの定式化を行った。現在のモデルはプロトタイプであり、今後実際の適用を通じて改良して行く必要がある。以下に本モデルにおいて検討すべき幾つかの課題を指摘して、本稿を終えることにする。

(1) 本モデルはエネルギー財の消費とそれに伴うCO₂排出を需要側で捉えるため、資源の枯渇に伴う問題を扱うことができない。しかしながら、化石燃料と将来普及が予想される再生可能エネルギーとの代替を分析対象とする場合など、エネルギー財を資源側で捉える方が望ましい場合もある。ただし5.4で述べたように、排出税に関してはこの2つの方法は代替的であって、資源側と需要側を同時に考えることには技術的困難が伴う。

(2) 交易パターンと多地域の価格均衡の決定には輸送費が重要な役割を果たすから、運輸部門を独立させ、運輸需要を派生需要として扱うことが望ましい。しかしデータの利用可能性から、サービス部門の内数として扱わざるを得ない。ただし運輸部門を切り離せたとしても、運賃をどこの業者に支払うかを定めることは困難である。実際、GTAPは世界共通の運輸業者を想定することで問題を回避している。

(3) 本モデルでは、気候変動の影響として洪水・渇水の生産面でのフロー効果のみを考慮しているが、洪水に関してはストック効果も無視できない。ストック効果は物的・人的資本の滅失として表現され、その影響は来期以降に及ぶ。さらに健康被害のように、効用に影響する効果も考慮すべきかも知れない。

(4) 途上国経済の将来予測に、均衡を前提とするCGE型モデルを使うことについて、マクロ計量モデルを使うべきとの批判がある。しかし途上国では、パラメータ推定に必要な自由度の確保に難があり、またパラメータが過去のトレンドに支配されることから、超長期の予測には適さないと思われる。市場機構を記述する均衡モデルの方が、構造変化に対応できる可能性があるからである。³³しかし均衡モデルに関しても、技術変化を含む将来予測の困難には変わりがない。

(5) 300km四方というメッシュサイズは、全地表水が1方向に流出すると考えるには大きすぎる。メッシュを幾つかの三角形要素に切るなどの方法により、分析精度を上げる工夫が必要であろう。

³³本モデルでは、為替調整を考慮していない。すべての価格変数は基準年の単一通貨の価値(たとえば2000年の米ドル)で表示されるものとする。為替に関する裁定取引などは短期的なもので、超長期には価格均衡が達成されると考えるからである。

謝辞

本研究は水資源環境研究センター客員講座の研究プロジェクトの一環として実施された。また科学研究費(基盤研究(A)16206052)「人口の量的・質的变化プロジェクト」(代表者:安藤朝夫)の補助を受けたことも記して謝意を表する。

参考文献

- 安藤朝夫(研究代表者)(1996): 価格差を考慮した多地域計量モデルによる交通基盤整備プロジェクト評価システムの開発, 文部省科学研究費補助金研究報告書。
- 安藤朝夫・高橋顕博(1997): 多地域均衡モデルによる阪神・淡路大震災の経済被害推計上の問題, 土木計画学研究委員会阪神・淡路大震災調査研究論文集, pp.47-52。
- 環境庁(1997): 平成9年度・環境白書, 大蔵省印刷局。
- 土木学会編(1989): 土木工学ハンドブック, 第16編「計画数理」, 技報堂。
- 孟渤・安藤朝夫(2004): SCGEモデルにおける財輸送の考慮とワルラス法則; 中国基準均衡解による検証, 応用地域学研究, 9(1), pp.49-60。
- 高木朗義・武藤慎一・太田奈智代(2001): 応用都市経済モデルを用いた治水対策の経済評価, 河川技術論文集 Vol.7, pp.423-428。
- Dimaranan, B.V. and McDougall, R.A. (2002): *Global Trade, Assistance, and Production: The GTAP 5 Data Base*, Center for Global Trade Analysis, Purdue University。
- Harker, P.T. (1987): *Predicting Intercity Freight Flows*, VNU Science Press BV。
- IBRD (2005): *World Development Indicators* (2005 ed.), World Bank。
- IPCC (2000): *Emissions Scenarios*, Cambridge Univ. Press。
- Johns, T.C. et al. (1997): The second Hadley Centre coupled ocean-atmosphere GCM: model description, spin up and validation, *Climate Dynamics* 13, pp.103-134。
- Meadows, D.H. et al. (1974): *Dynamics of Growth in a Finite World*, Wright-Allen Press。
- Nakatsuka, J. (2004): *World Continental Modeling Considering Water Resources Using System Dynamics*, 京都大学大学院工学研究科修士論文。
- Nordhaus, W.D. and Boyer, J. (2000): *Warming the World; Economic Models of Global Warming*, MIT Press。

Simonovic, S.P. (2002): World water dynamics: global modeling of water resources, *Journal of Environmental Management* 66, pp.249–267.

Uzawa, H. (2003): *Economic Theory and Global Warming*, Cambridge Univ, Press.

Development of a Recursive Model for Economic Evaluation of Global Warming

Asao Ando*, Toshiharu Kojiri, Shoko Kikuchi** and Kazunori Nakajima***

*Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

**Honshu-Shikoku Bridge Expressway Co.Ltd.

***Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

Synopsis

As global warming becomes the issue of human sustainability, the General Circulation Model (GCM) has been developed to forecast future climate change. While its results are based on fixed scenarios of economic activities, we propose a recursive dynamic model that can be operated interactively with a GCM. Then it is important to interface the spatial and time scales used in economic and circulation models. The former is formulated as a SCGE model that calculates quantities of goods and CO₂ emission, which are priced through the market, considering impacts of floods and droughts caused by climate change.

Keywords : global warming, spatial computable general equilibrium, recursive dynamics, space-time resolution